

APPLICATION OF NMPC FOR PMSM DRIVE CONTROL

Michal Kozubík

Master Degree Programme (2), FEEC BUT

E-mail: xkozub05@vutbr.cz

Supervised by: Pavel Václavek

E-mail: vaclavek@feec.vutbr.cz

Abstract: This paper deals with the application of nonlinear model predictive control for permanent magnet synchronous motor drive control. The proposed algorithm is compared with well-known field oriented control with the focus on the ability of velocity and current control. Finally, computational demands of the proposed algorithm are discussed.

Keywords: Nonlinear Model Predictive Control, Permanent Magnet Synchronous Control, Field Oriented Control, ACADO toolkit

1 ÚVOD

Při používání střídavých motorů se čím dál častěji volí synchronní motory. Častou volbou pak bývají synchronní motory s permanentními magnety (PMSM - permanent magnet synchronous motor). Jejich nespornou výhodou, například oproti asynchronním motorům, je dosažení vysokých výkonů při malých objemech. Tento typ motorů je pak základem pro servomotory, často využívané v robotice a průmyslové automatizaci. K zajištění správné funkčnosti se pak pro řízení PMSM nejčastěji používá strategie vektorového řízení (FOC - field oriented control).

Metoda vektorového řízení, i když je její návrh intuitivní a lze použít standardní poznatky o teorii řízení, s sebou nese různé komplikace. Mezi ně patří například nutnost použití kaskádní regulace a nemožnost motor odbudít bez použití doplňujících algoritmů. Proto se hledají pro tuto metodu různé alternativy. Jednou z nejznámějších je prediktivní řízení. Princip je následující. Ze znalosti aktuálních hodnot stavů je vypočten optimální akční zásah. Optimalita je jednak definována uživatelem sestavením požadované účelové funkce a jednak omezeními, ať už definovanými uživatelem, či danými fyzikálními vlastnostmi systému.

V praxi je prediktivní řízení používáno běžně ve zpracovatelském průmyslu, jelikož zde přítomné časové konstanty a tedy i periody vzorkování jsou dostatečně velké a nevystavují problémy s výpočetními nároky prediktivních algoritmů. Naopak v oblasti pohonů se používá v omezené míře, často za použití různých zjednodušení (například [4]), která pak vedou pouze na suboptimální řešení.

2 PRINCIP PREDIKTIVNÍHO ŘÍZENÍ

Pro správnou funkčnost prediktivního řízení je nutná znalost modelu řízeného systému a aktuálních hodnot jeho stavů. Díky těmto znalostem pak dochází k predikci jeho chování. Tato predikce je následně předložena optimalizačnímu algoritmu. Optimalizace je počítána na základně zvolené účelové, nebo též penalizační, funkce. Její volba závisí na uživateli a jeho požadavcích.

Běžně se pak za kritériální funkci používá kvadratická forma podobná té použité při návrhu výše zmíněného LQR regulátoru:

$$f(\mathbf{x}(k)) = \mathbf{x}(k)_N^T \mathbf{P} \mathbf{x}(k)_N + \sum_{i=1}^{N-1} (\mathbf{x}(k)_i^T \mathbf{Q} \mathbf{x}(k)_i + \mathbf{u}(k)_i^T \mathbf{R} \mathbf{u}(k)_i) \quad (1)$$

Výstupem optimalizace pak je sekvence akčních zásahů o délce shodné s délkou predikčního horizontu, podobně jako tomu je v případě LQR regulátoru. Nicméně v případě použití prediktivního regulátoru se použije pouze akční zásah pro první krok. Zbytek dat zůstává nevyužit. V dalším okamžiku výpočtu akčního zásahu dochází opět k optimalizaci. Tento postup, nazývaný ustupující horizont (receding horizon), má oproti LQR regulátoru výhodu v tom, že je odolnější vůči poruše a není nutné dopředu znát celou trajektorii požadavku. [1]

3 MODEL PMSM MOTORU

Jak již bylo výše zmíněno, pro správnou funkčnost prediktivního řízení je nutné znát model řízeného systému, pokud možno co nejpřesněji. Model synchronního motoru s permanentními magnety je běžně znám. Nejčastěji je uváděn v takzvaných rotorových (dq) souřadnicích.

Pro aplikaci byl tento model diskretizován Eulerovou metodou. Dále byl výpočet upraven na přírůstkový tvar regulátoru - byla počítána pouze změna akčního zásahu, ne jeho hodnota. Ve výsledku byl použit model motoru ve tvaru

$$\begin{aligned}
 i_d(k+1) &= (1 - T_s \frac{R_s}{L_d}) i_d(k) + T_s P_p \frac{L_q}{L_d} \omega_m(k) i_q(k) + T_s \frac{1}{L_d} (u_d(k) + \Delta u_d(k)) \\
 i_q(k+1) &= (1 - T_s \frac{R_s}{L_q}) i_q(k) - T_s P_p \frac{L_d}{L_q} \omega_m(k) i_d(k) - T_s P_p \Psi_{PM} \frac{1}{L_q} \omega_m(k) + T_s \frac{1}{L_q} (u_q(k) + \Delta u_q(k)) \\
 \omega_m(k+1) &= \omega_m(k) + T_s \frac{3 P_p}{2 J} [\Psi_{PM} i_q(k) + (L_d - L_q) i_d(k) i_q(k)] \\
 u_d(k+1) &= u_d(k) + \Delta u_d(k) \\
 u_q(k+1) &= u_q(k) + \Delta u_q(k),
 \end{aligned} \tag{2}$$

kde R_s je odpor statorového vinutí, L_d a L_q je indukčnost v přímé, resp. v kvadrurní ose, Ψ_{PM} je magnetický tok permanentního magnetu. Stavové veličiny jsou proudy v přímé a kvadrurní ose i_d a i_q , tomu odpovídající přivedená napětí u_d a u_q a úhlová rychlost w_m .

4 IMPLEMENTACE

Pro správnou funkčnost prediktivního řízení je nutná volba optimalizačního solveru. Matlab přímo nabízí pro řešení nelineárních optimalizačních problémů funkci `fmincon`, na níž byly postaveny příklady NMPC v [2], ale ukázalo se, že tato funkce je z praktického hlediska nepoužitelná. Mezi hlavní problémy patřilo to, že algoritmus na ní postavený byl příliš výpočetně náročný. Mnohem vhodnější volbou se ukázal open-source toolkit ACADO [3]. Optimalizace je prováděna přístupem sekvenčního kvadratického programování, přičemž dílčí kvadratické podproblémy jsou řešeny metodou množiny aktivních omezení (active set method).

Podstatným důvodem pro volbu tohoto toolkitu bylo to, že jednou z jeho funkcionalit je i generování kódu či samostatného regulátoru realizovaného v jazyce C. V současném stavu realizace byl použit samostatný regulátor, který byl následně v simulaci volán.

5 VÝSLEDKY

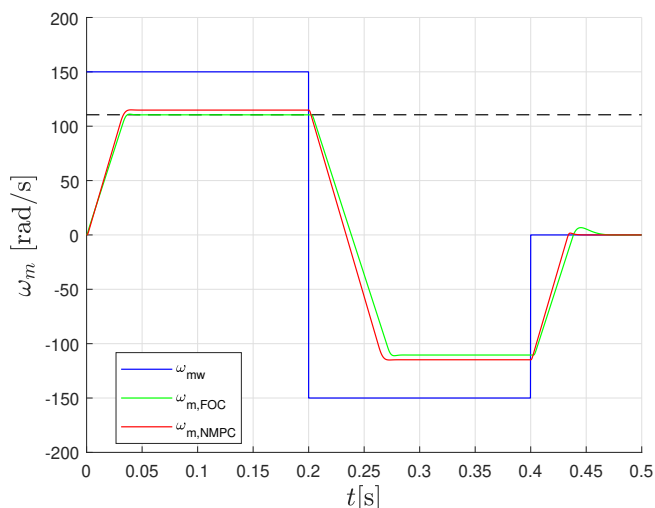
Testování navrženého regulátoru bylo prováděno v Simulinku. Parametry byly zvoleny na základě motoru použitého v [4] a jsou uvedeny v tabulce 1. Pro porovnání bylo pro tento motor navrženo i vektorové řízení. Simulace byly prováděny na osobním počítači. Simulace běžela s pevným krokem $T_{sim} = 2 \cdot 10^{-5}$ s a použitou metodou integrace `ode8`. Použité algoritmy měly periodu vzorkování $T_{s,FOC} = 2 \cdot 10^{-4}$ s a $T_{s,NMPC} = 2 \cdot 10^{-4}$ s

R_s	0,38 Ω
L_d	535 μH
L_q	535 μH
P_p	3
Ψ_{PM}	0,02594 Wb
J	$65 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
I_{MAX}	2 A
U_{MAX}	8.6 V

Tabulka 1: Přehled parametrů použitého motoru

Prvním sledovaným parametrem u obou algoritmů bylo, zda dokáží zdárně zaříditi sledování požadavku na rychlost. Výsledné průběhy rychlostí jsou uvedeny na Obr. 1. Požadavek byl záměrně zvolen větší, než kterého je motor schopen dosáhnout pomocí připojeného napětí.

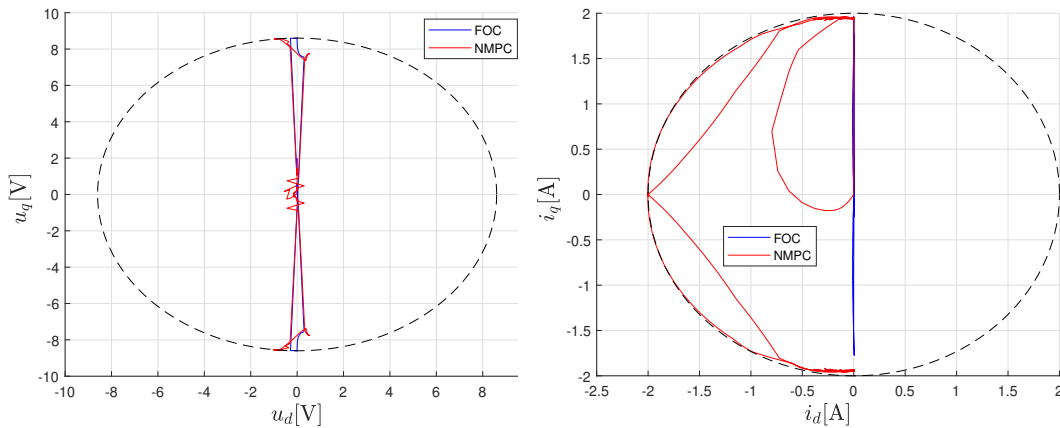
Je možné si všimnout, že při řízení regulátorem využívajícím algoritmus nelineárního prediktivního řízení, bylo dosaženo vyšší rychlosti. To bylo způsobeno tím, že tento regulátor je ve své základní konfiguraci schopen řízený motor odbudit. To v případě vektorového řízení není možné, protože přímá složka proudu je při použití této strategie zpravidla regulována na nulovou hodnotu. Důsledkem toho je, že maximální rychlost, jíž je takto řízený motor schopen dosáhnout, závisí na parametrech motoru samotného a na velikosti napájecího napětí. Tato hodnota je v grafu vynesena černou čárkovanou čarou.



Obrázek 1: Průběhy rychlosti

Dalšími pozorovanými veličinami jsou proudy a napětí. Na Obr. 2 jsou tyto veličiny vyneseny v dq souřadnicích. U těchto veličin je zásadní, aby nepřekročily omezení daná parametry motoru. Tato omezení jsou vynesena černou čárkovanou čarou. Je patrné, že při obou strategiích omezení překročena nebyla. Při zaměření se na napětí je patrné, že většina změn probíhala v kvadrantní složce v případě řízení oběma strategiemi.

U proudů lze vidět markantnější rozdíly. V případě řízení metodou vektorového řízení je přímá složka udržována na nulové hodnotě, jak bylo uvedeno výše. Naopak při řízení prediktivním se vektor proudu pohybuje v celé levé polorovině dq prostoru. To má za následek částečné odbuzení motoru a dosažení vyšších rychlostí.



(a) Napětí

(b) Proudů

Obrázek 2: Průběh proudů a napětí v dq souřadnicích

Jedním ze zásadních omezení, na která naráží praktické použití prediktivních algoritmů je jejich výpočetní náročnost. V tomto případě bylo pomocí profileru v Simulinku zjištěno, že průměrná doba výpočtu akčního zásahu byla $T_{calc} \approx 0,8$ ms, což je stále více než byla použita perioda vzorkování. Tento čas je zásadně ovlivněn tím, že dochází k volání externího kódu.

6 ZÁVĚR

V tomto článku byl představen algoritmus nelineárního prediktivního řízení pro řízení synchronního motoru s permanentními magnety. Bylo demonstrováno jeho použití a tento algoritmus byl porovnán s běžně používaným vektorovým řízením. Porovnání bylo provedeno s ohledem na řízení rychlosti a splnění omezení u proudů a napětí. Byla také diskutována časová náročnost tohoto algoritmu. Další práce spočívají v použití generovaného kódu pro vytvoření samostatné s-funkce a případné implementace pro praktickou realizaci.

PODĚKOVÁNÍ

Tato publikace vznikla za podpory grantu číslo FEKT-S-17-4234 - "Průmysl 4.0 v automatizaci a kybernetice" financovaného z Interní grantové agentury Vysokého učení technického v Brně a za podpory projektu TE01020197 "Centrum aplikované kybernetiky 3" financovaného Technologickou agenturou České republiky.

REFERENCE

- [1] CAMACHO, E. F.; ALBA, C. B.: *Model predictive control*. Springer Science & Business Media, 2013, ISBN 1-85233-694-3.
- [2] GRÜNE, L.; PANNEK, J.: *Nonlinear model predictive control*. Springer, 2017, ISBN 978-3-319-46023-9.
- [3] HOUSKA, B.; FERREAU, H. J.; DIEHL M.: ACADO Toolkit - An Open Source Framework for Automatic Control and Dynamic Optimization. *Optimal Control Applications and Methods*, ročník 32, č. 3, 2011: s. 298–312.
- [4] MYNÁŘ, Z.; VESELÝ, L.; VÁCLAVEK, P.: *PMSM Model Predictive Control With Field-Weakening Implementation*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, ročník 63, č. 8, 2016: s. 5156-516.